Partie 3 : Biophysique des rayonnements

Chapitre 1 : Imagerie médicale : généralités et exemples

Introduction :

Les rayonnements en médecine et leur étude sont d'une importance fondamentale pour expliciter et aider au diagnostic ou à la thérapeutique. Nous étudions, ici, les rayonnements de type électromagnétique essentiellement. Il y a 2 types d'ondes : mécaniques et électromagnétiques, d'origine physique et de comportements différents. L'onde électromagnétique peut se propager dans le vide, à la différence de l'onde sonore qui a besoin de milieu matériel pour se propager.

Radiation électromagnétique :

Définition :

C'est la propagation simultanée d'un champ électrique ($\vec{E}$) et d'un champ magnétique ($\vec{B}$) qui vibrent à la même fréquence.

Si ($\vec{E}$) et ($\vec{B}$) sont en tout point de l'espace et à tout instant perpendiculaires, on dira que l'onde est plane.

Périodicité temporelle et périodicité spatiale :

Longueur d'onde (λ) :

Caractérise la distance parcourue par l'onde en une période temporelle (T).

Fréquence (f) :

Correspond au nombre de fois où l'onde oscille sur un cycle chaque seconde. C'est l'inverse de (T), (T) étant la période temporelle correspondant à (λ).

$$f = \frac{1}{T}$$

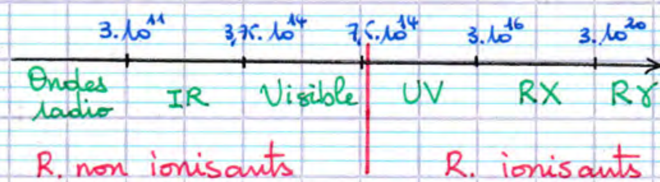
Célérité d'une onde (V) :

Vitesse à laquelle l'onde se propage dans le milieu considéré (dans le vide : $c = 3.10^8 m.s^{-1}$).
Il est possible d'écrire l'expression de (λ) en fonction de la période (T) ou de la fréquence (f) tenant compte de la vitesse (V) de l'onde dans le milieu considéré.

$$\lambda = VT = \frac{V}{f}$$

((λ) dépend du milieu dans lequel se propage l'onde, c'est une caractéristique extrinsèque de l'onde électromagnétique).

Classification :



Une onde électromagnétique ionisante est une onde d'énergie supérieure à 13,6 eV.

Dualité onde-corpuscule :

L'expérience de l'effet photoélectrique a mis en défaut la théorie ondulatoire de la lumière.
Einstein, en reprenant la théorie de Quantas de Planck, explique l'effet photoélectrique en considérant la lumière comme constituée de corpuscules, les photons, les énergies accumulées en paquets et appelées les Quantas, avec pour chaque Quantum une énergie appelée (E) qui s'écrit :

$$E = h\nu$$

Avec : h : constante de Planck $= 6,6.10^{-34}$ SI

Du fait de la loi du Tout ou Rien, l'énergie du photon doit être supérieure ou égale à (W) (l'énergie nécessaire pour libérer l'e^-)

En ce sens, l'énergie cinétique de l'e^- s'écrit donc:

$$E_c = E - W.$$

$$E_c = h\nu - W$$

Dans le vide : $\lambda = \frac{c}{\nu}$.

Donc :

$$E_c = \frac{hc}{\lambda} - W.$$

Il est possible de définir l'énergie seuile (W_0) qui est l'énergie nécessaire et suffisante pour arracher l'e^- à l'attraction du noyau, cette énergie correspond à une fréquence (ν_0) et à une longueur d'onde (λ_0) appelées fréquence seuil et longueur d'onde seuil, et qui permet de caractériser la frontière entre la possibilité d'arracher l'e^- et l'impossibilité de le faire (ionisation de la matière).

$$\lambda_0 = \frac{h.c}{W_0} = \frac{12400}{W_0\,[eV]}$$

$$1eV = 1{,}6.10^{-19}\ J.$$

Notion dualistique de la lumière:

La notion dualistique de la lumière, exprimée par Louis de Broglie, s'écrit sous la forme de l'équation suivante:

$$p = \hbar.k.$$

Avec: $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ et $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

On écrit alors : $p = \frac{h}{\lambda}$

Rayonnement particulaire :

Lorsque les particules sont animées de vitesses de plus en plus importantes (particules relativistes) : $\frac{v}{c} \geq 0,1$, la mécanique de Newton n'est plus capable d'expliquer leur comportement. Einstein a ainsi développé une théorie permettant d'expliciter le comportement de ces particules dites relativistes.

Postulats :

- Le repos absolu n'existe pas.
- Tous les référentiels galiléens sont équivalents pour décrire les lois fondamentales de la physique.
- Il existe une vitesse limite pour toute propagation, c'est une constante universelle, elle vaut :

$$c = 3.10^8\ m.s^{-1}.$$

Aspects énergétiques :

Énergie totale : $E = m.c^2$.

Énergie au repos : $E = \alpha.\ m_0.c^2$.

Énergie cinétique : $E_c = (\alpha - 1).m_0.c^2$.

Avec : $\alpha = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ et $\beta = \frac{v}{c}$

Quantité de mouvement et Énergie :

$$E^2 = m_0^2.c^4 + p^2.c^2.$$

Chapitre 2 : Rayonnement X

Introduction :

Les RX ont été découverts par Roetgen en 1895. Leur utilisation est d'une importance fondamentale tant dans le domaine du diagnostic que dans le domaine de la thérapeutique. Ils sont issus du cortège électronique de l'atome.
Les RX et les Rγ diffèrent du fait de leurs origines.

Production de RX :

Selon le schéma synoptique du tube de Coolidge, un filament chauffé permet l'émission d'e⁻, accélérés par une tension accélératrice (U) de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de Volts. Ces e⁻ accélérés sont alors dirigés vers l'anode (anti-cathode) en entrant alors en collision avec celle-ci pour produire des RX.
Dans ce cadre, la longueur d'onde limite (λ) caractérisant les RX dépend directement de cette tension (U) accélératrice.

Rendement du tube de Coolidge :

$$dW_{ray} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot I \cdot Z \cdot E_0^2 \cdot dt$$

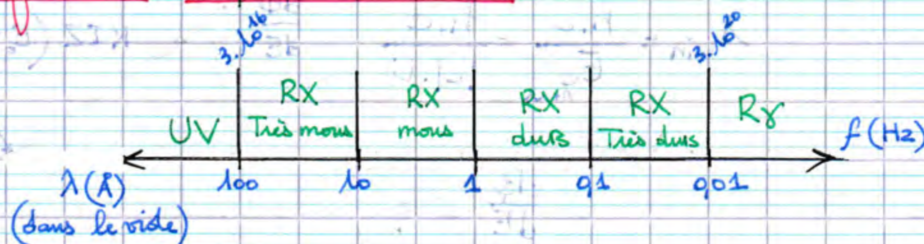
$$dW_{fournie} = U \cdot I \cdot dt$$

$$\Rightarrow r_d = \frac{dW_{ray}}{dW_{fournie}}$$

Variation de la température au niveau de l'anode :

$$dT = \frac{dW_{fournie} - dW_{ray}}{m_{anode} \cdot C_{anode}}$$

Classification : Spectre des RX :



Émission de RX : Spectre RX :

Le RX est issu de l'interaction Coulombienne avec le rayon atomique, il y a là une décélération forte des e^-, conduisant à un RX, ce rayonnement est appelé rayonnement de freinage. Les e^- peuvent également entrer en collision avec les e^- des couches profondes de l'atome, il y a là également génération de RX, on parlera de RX dûs aux collisions, c'est ce type de RX qui est capable de caractériser la nature de l'anode.

Éléments de physique atomique :

Nombres quantiques :

n : nombre quantique principal, il quantifie l'énergie totale de l'e^-.

l : nombre quantique secondaire $(n > l)$, il qualifie le moment cinétique orbital.

m : nombre quantique magnétique $(-l < m < l)$.

(s) : nombre quantique du spin $\left(\frac{1}{2} \text{ ou } -\frac{1}{2}\right)$.

j : nombre quantique quantifiant le moment cinétique global (orbital et propre) $(j = |l + s|)$.

Conditions sur les nombres quantiques :

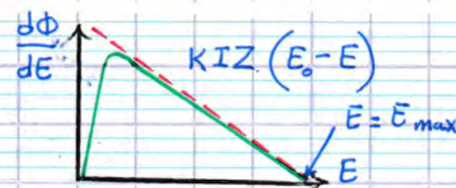
La conservation du moment cinétique lors de transitions électroniques impose des conditions sur les nombres quantiques. Les règles de sélection sont :

$$\Delta l = \pm 1$$

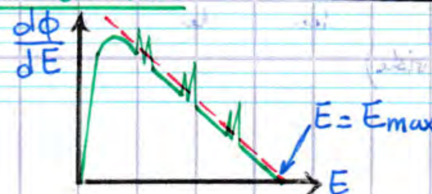
et : $\Delta j = 0$ ou $\Delta j = \pm 1$

Spectre continu :

$$\lambda_{min} = \frac{h.c}{E_{c_{max}}} = \frac{h.c}{|e|.U}$$



Spectre discontinu + continu :



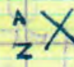
Chapitre 3 : Noyau atomique et Radioactivité

Noyau :

Définition :

Un noyau est constitué de (Z) protons et de (N) neutrons. On définira la charge électronique du noyau comme étant égale à (Z), on définira également le nombre de masse (A) :

$$A = Z + N$$

Symbole du noyau :  $^{A}_{Z}X$

Spécificité d'appellation :

Isobares : sont des nucléi de même nombre de masse (A).

Isotones : sont des nucléi de même nombre de neutrons et et de nombre de masse différent.

Isotopes : sont des nucléi de même numéro atomique (Z) mais de nombre de masse (A) différent.

Dimension du noyau :

Le rayon (R) du noyau s'écrit :

$$R = R_0 . A^{\frac{1}{3}}$$

Cette expression est issue d'une vision semi-ampirique.
Le rayon d'un atome est d'un ordre 100.000 fois supérieur au rayon du noyau.

Défaut de masse :

Le défaut de masse (Δm) s'exprime comme la somme :

$$\Delta m = \sum_i m_i - m$$

Avec : Σ_i : la somme de masse de différent particules composant le système lié.
m : la masse du système lié.

Dans le cadre du noyau :

$$\Delta m = Z . m_p + (A - Z) m_n - m_{noyau}$$

Exprimer l'énergie (E) de liaison de ce noyau revient à écrire : $E = \Delta m . c^2$.

Énergie de liaison :

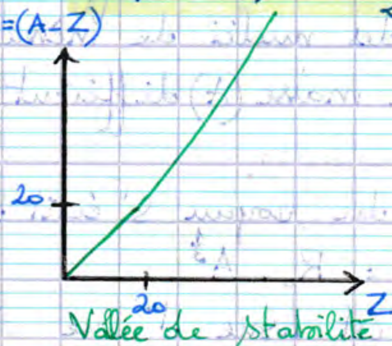
L'énergie de liaison moyenne par nucléon permet de caractériser la stabilité d'un noyau (comme pourrait l'indiquer la courbe d'Aston.

$$W_L = \frac{W(A,Z)}{A}$$

Considérer un noyau comme stable revient à mettre en le rapport de l'attraction nucléaire vis-à-vis de la répulsion Coulombienne. Ainsi, on parlera de noyau stable sur la base des paramètre suivant.

$$Z < 20 \Rightarrow N = Z$$

$$Z > 20 \Rightarrow N = \frac{3}{2} Z$$



Vallée de stabilité

Réactions de fusion et de fission.

Réaction de fission:

Est une réaction fortement exoénergetique, un nucléide lourd va se briser pour donner naissance à des nucléides plus légers et stables, caractérisés par des énergies de liaisons par nuléon plus grandes.

Réaction de fusion :

Il s'agit d'une réaction non spontanée, très fortement énergétique.

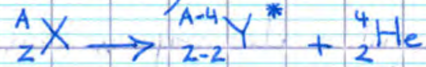
2 nucléides légers fusionnent pour donner un élement plus lourd (l'énergie de liaison par nucléon plus grande)

plus stable.

Radioactivités (α, β, γ) :

Radioactivité α :

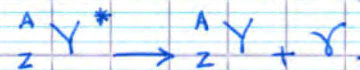
Cette réaction amène le noyau atomique vers une zone plus stable (obtention d'un noyau Y souvent dans un état excité et d'un noyau d'He).



$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y^{*} + {}^{4}_{2}He$$

Le noyau Y reviendra à son état fondamental en émettant un ou plusieurs photons γ.

Émission γ :

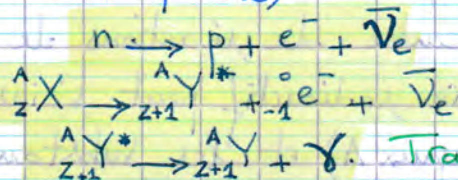


$${}^{A}_{Z}Y^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + \gamma.$$

Radioactivité β :

Il y a là 2 types de radioactivité : β^- et β^+.

Radioactivité β^- : se caractérise par des nucléides en excès de neutrons. Un neutron de ce nuclé se désintègre alors en un proton, un e^- et une particule appelée « antineutrino » (masse nulle, charge nulle, spin ½).

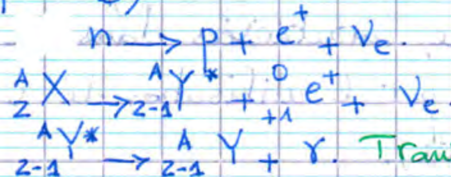


$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y^{*} + {}^{0}_{-1}e^- + \bar{\nu}_e$$

$${}^{A}_{Z+1}Y^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + \gamma.$$ Transformation isomérique.

Radioactivité β^+ : de la même manière, un nucléide se désintègre en un neutron, un positon et un neutrino (masse nulle, charge nulle, spin $-\frac{1}{2}$).



$$n \rightarrow p + e^+ + \nu_e.$$

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y^{*} + {}^{0}_{+1}e^+ + \nu_e.$$

$${}^{A}_{Z-1}Y^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \gamma.$$ Transformation isomérique.

Capture électronique :

Du fait d'un déficite électronique, la capture électronique d'un e^- proche du noyau par un proton, permet d'écrire :



$\Delta A = 0 \; ; \Delta Z = -1$



Période radioactive - Loi de décroissante :

Soit N_0 le nbre de noyaux non désintègrés à l'instant initial.

Soit N le nbre de noyaux non désintègrés à l'instant (t)

$$N = N_0 . e^{-\lambda t}$$

Avec : λ : constante radioactive du noyau considéré.

On écrit (T) la période radioactive, la période correspondant à la désintègration de la moitié de la population nucléique.

$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Activité et équilibre radioactif :

On définie l'activité d'une substance radioactive comme le nombre de désintègrations par unité de temps [Bq/S]

$$a = a_0 . e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Dans le cadre de réactions de désintègrations de nucléides, un équilibre radioactif peut s'instaurer, entre les substances mères (noyaux A) et les substances-filles (noyaux B), et on écrit :

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{T_A}{T_B}$$

N.B. :

On peut caractériser 2 types de radioctivité : naturelle et artificielle, caractérisés dans le monde médical (médecine nucléaire, par l'utilisation de radio-élements de demi-vies très courte).

Interaction rayonnements - matière :

Se caractérise par des interactions avec le cortège électronique ou avec le noyau, des édifices atomiques ou moléculaires que traversent les rayonnements (électromagnétiques ou de type particulaires). Ces interactions contribuent à l'atténuation de l'intensité du faisceau incident. Nous introduisons ainsi la notion de couche de demi-atténuation

Définition de la CDA :

C'est l'épaisseur que doit avoir un écran pour ne laisser passer que la moitié du flux incident.

$$N(CDA) = N_0 . e^{-\mu(CDA)} = \frac{N_0}{2}$$

$$\mu CDA = \ln(2).$$

Avec : μ : coefficient massique d'atténuation.

Interactions élémentaires :

Du point de vue des interactions élémentaires, les collisions peuvent être d'ordre inélastique (l'effet photoélectrique par exemple).

L'interaction avec les couches profondes générera une émission de photons de fluorescence, et avec les couches périphériques l'éjection d'un e^- Auger.

Dans le cadre de collisions de type élastiques, et à l'inverse de la collision inélastique, il y a là conservation avant et après le choc de la nature et nombre des particules.

Pour exemple, l'effet Compton, qui se caractérisera avec l'émission d'un photon diffusé dit de recul.

Ces effets sont d'une importance considérable dans le domaine biomédical (flou des images en radio-diagnostic, énergie perdue ou incontrôlable en radio-thérapie, irradiation accidentelle...).

Éléments de radiobiologie :

Transformer un rayonnement naturellement indécelable est nécessaire pour pouvoir le caractériser, en faisant en sorte que ce rayonnement soit perçu, en utilisant des signaux correspondant aux plages de sensibilité de nos sens.
Il existe pour cela 2 catégories de détecteurs : physiques d'abord, et électroniques.

Dosimétrie : Caractérisation :

Elle a pour but de déterminer l'énergie déposée dans la matière.
La dose (D_T) absorbée par un organe / tissu s'exprime en Gray [Gy]
La dose équivalente (H_T) s'écrit :

$$H_T = D_T \cdot W_R$$

(W_R) est le facteur de pondération qui tient compte de la nature du rayonnement.
(H_T) s'exprimer Sievert [Sv]
La dose efficace (E) s'écrit :

$$E = \sum (H_T \cdot W_T)$$

(W_T) est le facteur de pondération tissulaire qui tient compte de la radiosensibilité propre de chaque tissu ou organe.
(E) s'exprime également en Sievert [Sv].

Rayonnements ionisants : effets biologiques :

Effets déterministes :

- Fortes doses.
- Délai d'apparition court.
- Effets à seuil.
- Gravité augmente avec la dose.

Effets aléatoires (stochastiques):

- Faibles doses.
- Délai d'apparition long.
- Pas de seuil.
- Chez les individus atteints : effets identiques quelle que soit la dose.
- Probabilité d'apparition augmente avec la dose.

Irradiation externe ou interne:

- Source à l'extérieur du corps humain (radio-isotope, accélérateur)
- Source à l'intérieur du corps après ingestion ou inhalation d'un radio-isotope.

Laser:

L'effet Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations) correspond à la transformation d'une énergie quelconque en énergie lumineuse.

L'objectif est de disposer d'un faisceau lumineux cohérent de forte énergie.